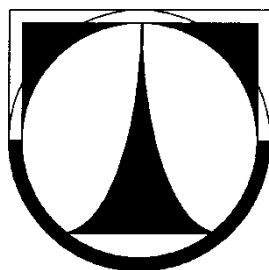


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra materiálu**



**Studium problematiky chování geopolymerních materiálů  
při opakovaném tepelném zatěžování**

**Study of behavior issues geopolymer materials under  
repeated thermal loading**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Jindřich Fofonka**

2012

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu



Studijní program: B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie

Materiálové inženýrství

**Studium problematiky chování geopolymerních materiálů  
při opakovaném tepelném zatěžování**

**Study of behavior issues geopolymer materials under  
repeated thermal loading**

Bakalářská práce

KMT – BP – 188

Jindřich Fofůňka

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Trinh Thí Linh

Ing. Xiem Thang Nguyen

Počet stran: 43

Počet obrázků: 19

Počet příloh: 2

2012

**Místo pro vložení originálního zadání (BP)**

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

# **ANOTACE**

Jméno:	Jindřich Fofňka
Obor:	3911 R 018 Materiály a technologie
Zaměření:	Materiálové inženýrství
Téma práce:	Studium problematiky chování geopolymerních materiálů při opakovaném tepelném zatěžování
Číslo bakalářské práce:	KMT - BP - 188
Vedoucí bakalářské práce:	prof. Ing. Petr Louda, CSc.
Konzultant bakalářské práce:	Ing. Trinh Thí Linh Ing. Xiem Thang Nguyen

## **Abstrakt**

Předmětem této bakalářské práce je stanovení mechanických vlastností vybraných geopolymerních materiálů v závislosti na teplotě. Jsou to kompozity, které nejsou zcela známy, a dosavadní výzkum byl zaměřen na výzkum mechanických vlastností za nízkých teplot. Tato práce má za cíl vymežit základní mechanické vlastnosti vybraných geopolymerních materiálů v závislosti na vzrůstajících teplotách.

Teoretická část pojednává obecně o geopolymerech, jejich historii, dosavadních poznatcích, výrobě a použitých materiálech v geopolymerech.

V experimentální části je popsán způsob přípravy vzorků, metoda měření, postup vyhodnocení naměřených hodnot a následné porovnání výsledků v grafech a tabulkách.

**Klíčová slova:** Geopolymer, alkalická aktivace, popílek, čedičová textilie, skelná textilie, jemné kamenivo, Baucis L 160.

# **ANNOTATION**

Name: Jindřich Fofůka

Specialization: 3911 R 018 Materials and technologies

Focusing: Material engineering

Theme: Study of behavior issues geopolymer materials under repeated thermal loading

Number of BSC work: KMT - BP - 188

Leader of BSC work: prof. Ing. Petr Louda, CSc.

Consulter: Ing. Trinh Thđ Linh  
Ing. Xiem Thang Nguyen

## **Abstract:**

The subject of this thesis is to determine the mechanical properties of selected geopolymer materials based on temperature. They are composites, which are not fully known, and previous research has focused on the research of mechanical properties at low temperatures. This work aims to define the basic mechanical properties of selected geopolymer materials depending on the rising temperatures.

The theoretical part discusses generally geopolymers, their history, current knowledge, production and materials used in geopolymers.

In the experimental section describes the method of sample preparation, method of measurement, process evaluation of the measured values and then comparing the results in graphs and tables.

**Key words:** Geopolymer, alkaline activation, fly ash, basalt textiles, glass textiles, fine aggregate, Baucis L 160

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Petru Loudovi, CSc. a konzultantům panu Ing. Xiem Thang Nguyen a Ing. Trinh Thí Linh za odbornou pomoc při zpracování tématu, ochotu a množství poskytnutých rad.

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	TEORETICKÁ ČÁST .....	11
2.1	Geopolymery .....	11
2.1.1	Historie geopolimerů .....	11
2.1.2	Novodobé výzkumy v oblasti geopolimerů .....	12
2.1.3	Výroba .....	13
2.2	Použité materiály k přípravě vzorků .....	14
2.3	Mechanismus alkalické aktivace a struktura geopolimeru .....	15
2.3.1	Alkalická aktivace .....	15
2.3.2	Struktura geopolimeru .....	17
2.3.3	Příprava geopolimerů .....	17
2.4	Princip měření tvrdosti dle Leeba .....	18
2.5	Princip měření jednoosé napjatosti v tlaku .....	19
2.6	Zkouška tahem .....	19
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	21
3.1	Tepelná stabilita vzorků v podobě válečků .....	21
3.1.1	Příprava zkušebních vzorků .....	21
3.1.2	Použité materiály pro výrobu geopolymerních směsí .....	22
3.1.3	Příprava zkušebních směsí pro vzorky v podobě válečků .....	22
3.1.4	Průběh tepelné zátěže válcových vzorků .....	23
3.1.5	Vizuální kontrola .....	24
3.1.6	Měření tvrdosti .....	25
3.1.7	Měření jednoosé pevnosti v tlaku .....	25
3.2	Tepelná stabilita geopolymerního vzorku ve tvaru tenké desky .....	27
3.2.1	Příprava vzorku .....	27
3.2.2	Upevnění vzorku do pece .....	28
3.2.3	Průběh tepelné zátěže .....	30
3.2.4	Tahová zkouška .....	30



4	VÝSLEDKY A DISKUSE .....	31
4.1	Výsledky naměřených hodnot válcových vzorků .....	31
4.2	Výsledky naměřených hodnot vzorku v podobě tenké geopolymerní desky	35
4.2.1	Hodnoty naměřené při zkoušce tahem .....	35
4.2.2	Naměřené hodnoty geopolymerní tenké desky termokamerou.....	37
5	ZÁVĚR .....	40
6	Seznam použité literatury .....	41
7	Přílohy .....	42

# 1 Úvod

Díky neustále se zvyšující lidské populaci a jejímu vývoji roste i spotřeba materiálů a surovin, které jsou z velké většiny déle nerecyklovatelné a zůstávají jako průmyslové odpady. Zejména u anorganických odvětví (např. slévárenství a stavební průmysl) jsou tyto materiály produkovány v řádech tisíců tun ročně. S růstem výroby je spojeno zvyšování těžby vstupních surovin a i zvýšení produkce následných odpadů při těžbě. Vzniká tak snaha o zdokonalování technologických postupů při výrobě, snižování energetických nároků a snižování emisí CO<sub>2</sub>. Proto se jako další možnost nabízí využití odpadů jako druhotných surovin.

Další možností uplatnění, díky tomu, že geopolymery vydrží vysoké teploty a dobře tepelně izolují tam, kde jsou potřeba levné a tepelně stabilní materiály. Jsou vhodné pro různé odvětví průmyslu, a to zejména tam, kde se pracuje s vysokými teplotami například slévárenství, nebo jako vyzdívky pecí. Cílem mé práce je zhodnocení vybraných vlastností geopolymerních materiálů, které budou mít při opakovaném tepelném zatěžování do 1000°C. V této práci se zabýváme pouze několika druhy, které ještě nebyly takto zkoušeny a poznatky budou sloužit jako vstupní poznatky pro další výzkum v této oblasti.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Geopolymery

Pod pojmem geopolymery se skrývají anorganicky uměle vyrobené (polymerní) materiály, které jsou připravovány reakcí základních hlinito-křemičitanových minerálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce byla označena jako geopolymrace. Díky ní lze využít řadu odpadních surovin (především elektrárenské a teplárenské popílků) a přeměnit je na plnohodnotné geopolymerní materiály. Geopolymery jsou na první pohled nerozeznatelné od kamene, ale svými vlastnostmi jej jednoznačně předčí. Nabízejí totiž úžasné možnosti modifikací a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky nimž materiál překrývá tisíciletí. Patří k nim především vysoká pevnost v tlaku a odolnost vůči kyselým dešťům, ohni i bakteriím.[1]

#### 2.1.1 Historie geopolimerů

První období vzniku umělého kamene je v době starých civilizací Mezopotámie a Egypt v letech 2000 př.n.l. Z nalezených pozůstatků je zřejmé, že v této době využívaly metody na výrobu umělého kamene v Egyptě a syntetický čedič v Mezopotámii. Tyto artefakty v podobě soch a kamenných nádob mají i po tolika letech hladký a lesklý povrch beze stop po nástrojích. Důkazy zde však ukazují, že staří umělci věděli, jak převést rudu a minerály v minerální pojivo pro výrobu soch, které nebyly vytesané z kamene, ale tvořeny ve formách. [2]

Vše tedy nasvědčuje tomu, že stavitelé ve starém Egyptě používali vyspělou technologii, která využívala dostupných přírodních zdrojů (vápenec, voda, jíl, soli) k výrobě geopolimerického betonu. Obrovské a neuvěřitelně přesné tvárnice pro stavbu pyramid dělníci neotesávali z kamenných kvádrů vytěžených v lomech Toura a Maadi poblíž Gízy, nýbrž je vyráběli z kamenné kaše, kterou ve velkém míchali v mělkých písečných nádržích a poté vylévali a pěchovali do předem připraveného dřevěného šalování. Tvárnice obsahují 93-97 % složek přírodního vápence, zbytek tvoří pojivo. V něm převažuje kaolinitický jíl z vápence v Gíze, podstatný je přídavek sody (ta pochází ze spalování palmového dřeva a natronové soli), která výslednou hmotu pojiva změnila v geologické lepidlo. Egyptanům se tak podařilo vytvořit geopolimerický cement chemicky srovnatelný s přírodním kamenem. To je důvod,

proč geologové nemohou klasickou metodou krystalografické analýzy rozlišit přírodní vápenec od umělého.[3]

Ke znovuobjevení alkalicky aktivovaných materiálů došlo v roce 1939 v souvislosti s rozvojem výroby alkalicky aktivovaných cementů. Alkalická aktivace se původně používala pro zlepšení mechanických vlastností betonu. Do cementu se přidávali příměsi např. vysokopecní struska, popílký a jiné průmyslové odpadní materiály. Výroba tohoto typu pojiv má dlouhou historii např. v bývalém Sovětském svazu, Skandinávii a ve Východní Evropě. [4]

### **2.1.2 Novodobé výzkumy v oblasti geopolymérů**

K průlomů došlo v roce 1972, kdy Michele Davidovits založil institut CORDI Geopolymere, zabývající se vývojem geopolymerních systémů, a v letech 1976-1979 navrhl Davidovits nový pojem “geopolymer” (téměř 20 let po Gluchovského pojmu “gruntosilikat”). Podle Davidovitsovy definice: “Geopolymer je látka, která vzniká anorganickou polykondenzací tzv. geopolymerací” (v důsledku alkalické aktivace aluminosilikátových látek). Na základě svých výzkumů vytvořil Davidovits strukturní model geopolymery (v tomto případě pro typ polysialate-siloxo vytvořený alkalickou aktivací metakaolinu). Ve svém modelu předpokládá v podstatě monolitický polymer podobný organickým polymerům. Další pokrok ve studiu mikrostruktury produktů alkalické aktivace – geopolymery, zejména výsledky studia metodami termické analýzy, Hg porozometrie, měřením izoterem BET a MAS NMR spektroskopii (Si, Al a zejména Na) vedl k určité revizi tohoto pohledu.[7]

Geopolymery nabízejí široké a různorodé uplatnění. Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit jako vynikající izolace a stavební materiál. První aplikace ve stavebnictví pocházejí z let 1972-1976, kdy byl geopolymer nanášen na dřevotřískové desky, aby zvýšil jejich ohnivzdornost. Geopolymerní cement Pyrament™ byl použit například na opravu letištní plochy v Los Angeles. V brzké době lze očekávat využití geopolymery při výstavbě silnic, mostů, budov a jiných původně betonových staveb. [1]

### 2.1.3 Výroba

Obecně se geopolymery vyrábějí alkalickou aktivací vhodného materiálu, jakými jsou odpadní materiály typu: elektrárenský popílek, strusky – nebo materiálů již využívaných v betonářském průmyslu (např. metakaolin a portlandský cement). Nejčastěji se zkoumají a využívají jejich různě připravené směsi spolu s plnivem (kamenivem a výztuží) ve snaze nalézt kombinaci s nejlepšími vlastnostmi.

Na světě existují ložiska pro výrobu geopolymérů, která se už nemusejí aktivovat, tedy tepelně zpracovávat při teplotě 600-700 °C. Znamená to, že při výrobě geopolymérů nevznikají žádné emise. V tuto chvíli jsou známá dvě taková ložiska. První se nachází v Austrálii, druhé v České republice.

Český triumf pro ekologickou výrobu geopolymérů představují haldy lupku poblíž Zbůhu u Plzně. Lupek je odpad z těžby černého uhlí. Původně se nacházel ve slojích (vrstvách) nad vrstvami uhlí. Protože jde o materiál málo kompaktní, který by se při rubání uhlí na horníky zřítil, bylo nutné ho odtěžit. Tak se stalo, že tato směs kaolínů a jílu s poměrně velkým množstvím organických látek byla navezená na haldy, jejichž výška dosáhla až 70 metrů.

Na haldách došlo k samovznícení materiálu, takže výše zmíněný proces aktivace už zde proběhl přírodní cestou. Uvnitř haldy hoří neustále, ale jde o endogenní (tedy vnitřní) hoření hlušiny s minimem kyslíku. Oxid uhličitý se při tomto procesu uvolňuje už dlouhá léta, ovšem v téměř neměřitelném množství. Právě teď přišel čas, aby lupek přestal zahálet a z kontrolovaného odpadu se stane výrobní surovina. Na haldách u Zbůhu je ho tolik, že by dokázal nahradit poptávku po cementu pro celou Českou republiku zhruba na 20 let. Přesto v nejbližší době půjde jen o doplněk výroby cementu, byť výslednou kvalitou nesrovnatelně lepší a ekologicky významnější. [5]

## **2.2 Použité materiály k přípravě vzorků**

### Elektrárenský popílek

Popílký vznikají při spalování tuhých paliv, zejména uhlí a tuhého komunálního odpadu. Jsou zachycovány z plynných spalin v kouřových odlučovačích. Hlavní složkou popílků jsou následující oxidy:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{MgO}$ . Z ekotoxikologického hlediska je v popílcích významný zejména obsah stopových prvků (těžkých kovů) jako je Cr, Pb, Ba, Zn, Ag, Hg, a A. V minulosti byly popílký především ukládány jako odpad na skládkách, avšak s ohledem na velké množství každoročně vznikajících popílků se hledají stále nové možnosti jejich dalších využití. V současné době se popílký používají ve stavebnictví jako náhrada některých složek stavebních materiálů. [6]

### Jemné kamenivo

Kamenivem se rozumí zrnitý anorganický materiál přírodního nebo umělého původu. Většinou je odpadním produktem při opracování kamene. Používá se jako částicové plnivo. Rozměry částic kameniva se pohybují v rozmezí od 1  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$  se složením Si a O v atomovém zastoupení poměrem 2:1.

### Skelná tkanina Industryglass RT 490 plátno

Kvalitní skelná rovingová tkanina, vyrobená ze skelných vláken typu E 4.5 x 3.6/ cm a plošnou hustotou 490g/m<sup>2</sup>.

### Čedičová tkanina- TK- 210 Basalt – plátno

Tkanina vyrobená z čedičových vláken s plošnou hmotností 200g/m<sup>2</sup> o tloušťce 0,18mm.

## 2.3 Mechanismus alkalické aktivace a struktura geopolymu

### 2.3.1 Alkalická aktivace

Alkalická aktivace je složitý proces vedoucí ke vzniku produktu odlišného od portlandského cementu zejména mikrostrukturou, která způsobuje vysokou odolnost proti působení agresivních látek. Významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti má druh a koncentrace použitého alkalického aktivátoru. Funkce alkalicky aktivovaného aluminosilikátového pojiva je založena na reakci, která probíhá mezi aluminosilikátem (vysokopecní granulovanou struskou) a sodnou nebo draselnou sloučeninou, která buď sama obsahuje, nebo její hydrolýzou vzniká, hydroxylový anion. Při reakci aluminosilikátové látky v silně alkalickém prostředí dochází především k rozrušení Si-O-Si vazeb. Dalším podstatným rysem této reakce je průnik atomů Al do původní Si-O-Si struktury. Vznikají aluminosilikátové gely (zeolitické prekurzory).

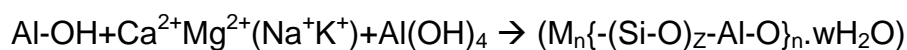
Jejich složení lze vystihnout vzorcem  $(M_n\{-(Si-O)_z-Al-O\}_n \cdot wH_2O)$  Kde M je prvek K, Na či Ca, n je stupeň polykondenzace a z je 1,2,3 nebo více než 3. V závislosti na výchozích látkách a podmínkách reakce mohou vznikat C-S-H a C-A-H fáze. Při těchto reakcích (polykondenzačního charakteru) může vznikat i sekundární  $H_2O$ . Podle charakteru výchozích surovin a podmínek reakce mohou vytvářet amorfni (gelové), částečně amorfni nebo krystalické látky. V procesu alkalické aktivace hraje značnou roli koncentrace pevné látky. Ve značně zředěných suspenzích (w větší než 1-10) vznikají převážně krystalické produkty typu zeolitů (analcim, Hydrosodalit a další). Tento postup je využíván pro syntézu umělých zeolitů. Při vyšší koncentraci pevné fáze v suspenzi (w nižší než 1) se vytvářejí převážně amorfni produkty. [7]



(Porušení vazeb Si-O-Si v silně alkalickém prostředí)



(neutralizace silanolátové skupiny)



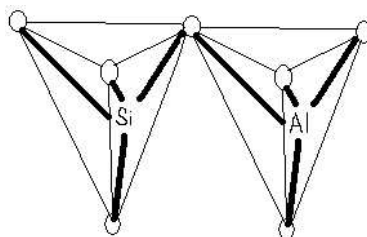
(kde M je K, Na či Ca, n je stupeň polykondenzace a z je 1,2,3 nebo více) [7]

Geopolymer může mít jednu ze tří základních forem podle poměrů Si/Al (Davidovits 1999) obr. 1 – obr.3 .[11]

1. *Polysialáty* :

Si /Al = 1

(-Si-O-Al-O-)

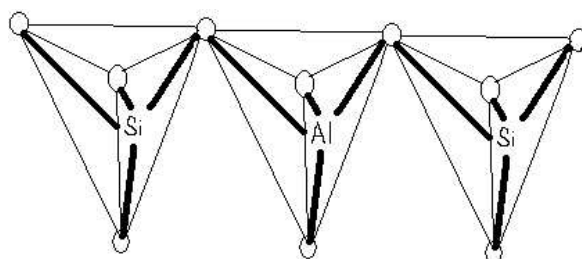


Obr. 1 Prostorové uspořádání PS [3]

2. *Polysiloxo-sialáty* :

Si /Al = 2

(-Si-O-Al-O-Si-O-)

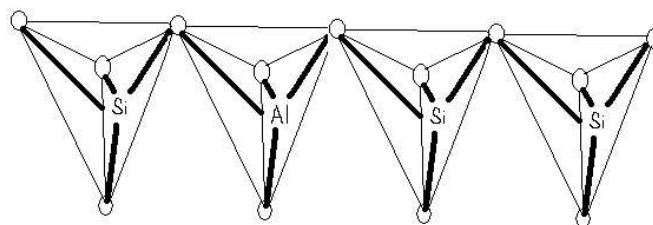


Obr. 2 Prostorové uspořádání PSS [3]

3. *Polydisiloxo-sialáty* :

Si /Al = 3

(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

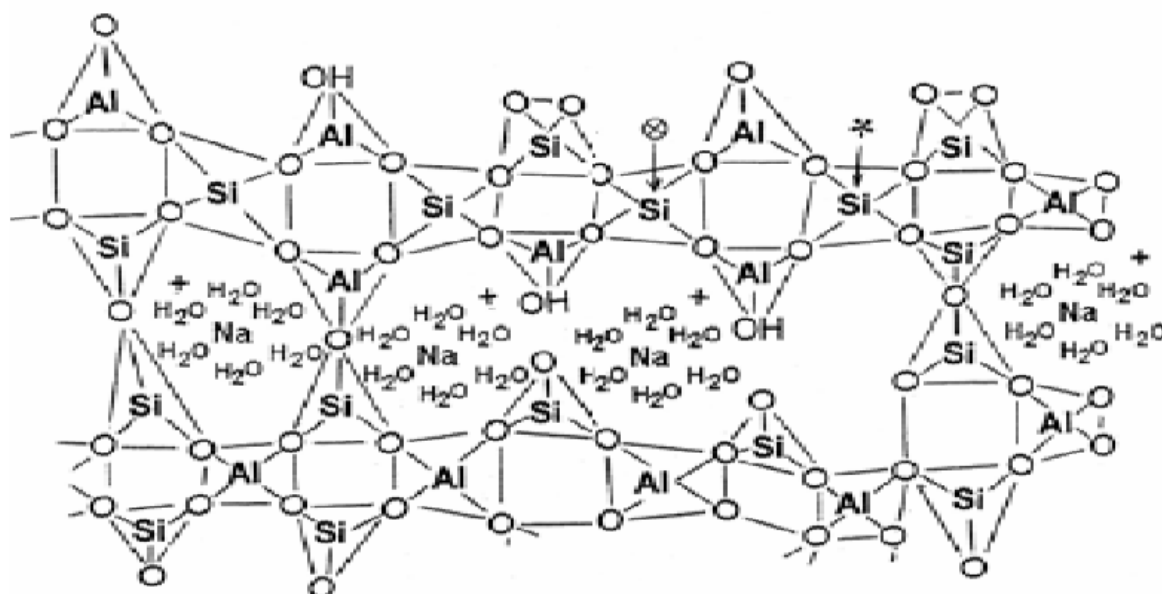


Obr. 3 Prostorové uspořádání PSDS[11]



### 2.3.2 Struktura geopolymery

Geopolymery mají trojrozměrnou amorfní mikrostrukturu, v níž jsou silikátové a aluminátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány polykondenzací přes kyslíkový můstek. Platí zde také Loewensteinovo pravidlo, které nám říká, že spojování tetraedrů, které v jádře obsahují hliník, je zakázáno. Takovéto tetraedry mohou být propojeny pouze přes minimálně jeden tetraedr, který ve svém jádře obsahuje křemík. Z toho vyplývá, že dialuminátový aniont  $\text{--Al--O--Al--}$  neexistuje. Tímto pravidlem je daný maximální poměr mezi Al:Si a je roven 1:1. [8]



Obr. 4 Současný pohled na strukturu sodného geopolymery [8].

### 2.3.3 Příprava geopolymery

Teorie na přípravu geopolymery se značně liší. V podstatě jsou známy dva základní postupy míchání polymerů. První postup preferuje nejprve smíchat pevné složky směsi, aktivátor připravit odděleně a následným smícháním těchto dvou složek směs aktivovat. Druhý způsob přípravy doporučuje obecně míchat směs v určitém pořadí - matakaolin, hydroxid, vodní sklo a strusku. Nezávisle na přidání složek je pro správný průběh chemické reakce důležitá homogenizace.

Příprava geopolymerních směsí se může značně lišit v závislosti na složení a vlastnostech aktivovaného materiálu. Obecně však platí, že chemická reakce, která probíhá při tvorbě geopolymerů, probíhá v roztoku, a tím je ovlivněn postup při přípravě těchto materiálů. V prvním kroku musí dojít k rozpuštění aktivované složky v silné alkálii (nejčastěji hydroxid alkalických kovů), přičemž rozpouštění se provádí při normální teplotě. V druhém kroku se přidává vodní sklo o známém silikátovém modulu, aby byl dosažen obsah alkálii. Poté se přidávají ostatní složky – plniva, příměsi, které zlepšují zpracovatelské vlastnosti i mechanické charakteristiky výsledného materiálu. [9]

## **2.4 Princip měření tvrdosti dle Leeba**

Měření tvrdosti dle ASTM A 956-00 – Dynamická (odrazová) metoda prováděná pomocí tvrzené kuličky vystřelené směrem k testovanému objektu. Na povrch naráží definovanou rychlostí resp. kinetickou energií. Nárazem vzniká deformace povrchu, díky které vnikající tělísko ztrácí část své energie. Ztráta energie je tím větší, čím větší je deformace - tedy čím je materiál měkčí. U tvrdších materiálů je deformace menší. Jako vnikající tělísko je použita kulička ze slinutých karbidů, která je vystřelena k testovanému povrchu pružinou, popř. u velmi tvrdých materiálů kulička diamantová. Ztráta energie je vyjádřena poměrem rychlosti vnikajícího tělíska před a po dopadu na testovaný povrch. Tento poměr vyjadřuje jednotku tvrdosti dle Leeba.

$$HL = \frac{v_r}{v_l} * 1000 \quad (1)$$

Výsledkem dynamické metody je hodnota tvrdosti v jednotkách HL (Leeb). Pro praktické použití je nutné hodnotu převést do jednotek např. HB či jiných. Neexistuje žádný exaktní vzorec pro převod jednotek, převodní křivky jsou určeny experimentálně. Pokud je naměřená hodnota převedena do jiné stupnice, uvádí se v závorce: měřící sonda: např. 264 HB (HLD). [10]

## **2.5 Princip měření jednoosé napjatosti v tlaku**

Zkušební vzorek je nejprve zvážen a jsou změřeny jeho rozměry. Z těchto hodnot se vypočítá objemová hmotnost vzorku. Vzorek je umístěn do zatěžovacího zařízení tak, aby síla působila osově. Je zatěžován svisle, měří se přetvoření vzorku v závislosti na rostoucím zatížení a průběh síly v čase. Průběh zkoušky lze definovat sadou vstupních parametrů. Některé parametry zkoušky mohou být řízenou veličinou, tzn., že je možné zadat požadované hodnoty. Řízenou veličinou může být poloha, síla, deformace, prodloužení a relativní prodloužení.

Zkoušky jsou prováděny v sériích po třech vzorcích. Série se od sebe liší materiálem pro přípravu vzorků, zda vzorek prošel před zkouškou tepelným zatížením. Vzorek je zatěžován až do porušení. V průběhu zkoušky je možné sledovat a zaznamenávat čas, přírůstek působící síly (resp. napětí) a deformaci. Výsledkem zkoušky je hodnota jednoosé pevnosti v tlaku  $R$  [MPa]. Při zkoušce tlakem za plochu považujeme průřez vzorkem před začátkem působení tlaku a síla je hodnota dosažena těsně před selháním materiálu.

$$R = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$F$  - maximální síla při porušení vzorku [N]

$A$  - zatěžovací plocha [mm<sup>2</sup>]

jednotky: MPa

## **2.6 Zkouška tahem**

Základními mechanickými vlastnostmi konstrukčních materiálů jsou: statická pevnost, mez kluzu, modul pružnosti, houževnatost a křehkost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a jiné. Mechanické zatěžování materiálu má za následek jeho deformaci. Podle stavu, ke kterému dojde po odlehčení, jsou deformace v zásadě pružné (elastické) či trvalé (plastické). Při nepřiměřeně vysokém namáhání dojde obvykle k nepřípustným deformacím, případně k porušení celistvosti (lomu).

Působení síly na těleso se vyjadřuje mechanickým napětím, tedy zatížením na jednotku plochy průřezu tělesa. Pokud síla působí kolmo na daný průřez, jedná se o normálové napětí, vyjádřené

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3)$$

Pro pochopení dějů probíhajících ve vzorku materiálu v důsledku vnějšího namáhání je účelné provést statickou zkoušku tahem, kterou lze dokumentovat pracovním tahovým diagramem, ve kterém je zachycena závislost deformace na napětí. Zvyšování napětí ve vzorku má za následek prodlužování zkušební vzorku, které je definováno poměrným prodloužením takto

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (4)$$

Po dosažení určité hodnoty napětí, takzvané *meze kluzu*  $R_p$ , se začne materiál trvale deformovat. Deformace je důsledkem posuvů vložených krystalografických rovin o násobky vzdálenosti atomů v krystalové mřížce. Měkké uhlíkaté oceli se vyznačují výraznou mezí kluzu, kdy plastická deformace probíhá do určitého stupně při prakticky konstantním napětí. V ostatních případech se zavádí smluvní mez kluzu,  $R_{p0,2}$

$$R_{p0,2} = \frac{F_p}{S_0} \quad (5)$$

kde  $F_p$  je síla působící prodloužení vzorku o 0,2 % původní délky.

Maximální napětí dosažené při tahové zkoušce se nazývá mez pevnosti v tahu  $R_m$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (6)$$

Po dosažení této hodnoty dochází k místní kontrakci vzorku a napětí (a s ním i zatěžovací síla) potřebné pro další deformaci klesá. Je nutno připomenout, že napětí je vztaženo na původní průřez  $S_0$  a skutečné napětí, vztažené na okamžitý průřez, naopak roste. V materiálu probíhají procesy, které vedou ke konečné fázi tahové zkoušky k lomu.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje metody, suroviny a přístroje, které byly použity pro přípravu a analýzu vzorků.

#### ***3.1 Tepelná stabilita vzorků v podobě válečků***

##### **3.1.1 Příprava zkušebních vzorků**

Zkušební vzorky pro zkoušku tvrdosti a pevnost v tlaku byly válečky o průměru 46 mm a výšce 90-95 mm. Jednotlivé směsi byly nejdříve homogenizovány pomocí míchání a poté umístěny do předem připravených forem. Vrchní strana zkušebních vzorků ve formě byla pomocí špachtle urovňována do roviny a vzduchové bubliny, byly odstraňovány pomocí laboratorního vibračního přístroje po dobu 3 minut. Jejich tvrdnutí probíhalo při laboratorní teplotě, zakryté folií ke zpomalení vysychání. K vyjmutí vzorků z forem docházelo většinou po 4-6 dnech. Další tvrdnutí probíhalo při laboratorní teplotě bez dalšího vlhčení, nebo zakrytí folií. Od každé směsi bylo vytvořeno 18 vzorků.

Formy pro zhotovení zkušebních válečků byly použity plastové trubky o rozměrech vzorku, přilepené silikonovým tmelem na desku.



Obr. 5 Formy pro přípravu vzorků.

### **3.1.2 Použité materiály pro výrobu geopolymerních směsí**

V experimentální části práce bylo použito několik geopolymerních pojiv vyvinutých v Českém lupkovém závodě v Novém Strašecí, a jelikož se jedná o zkušební směs, nelze prozatím prezentovat jejich přesné složení.

Pro přípravu pojivové složky geopolymerních směsí byly použity následující materiály:

Cement Baucis L160 složka A – komerčně dodávaná prášková složka

Aktivátor Baucis L160 složka B – komerčně dodávané geopolymerní pojivo, kapalná složka na bázi vodního skla.

Jako plniva geopolymerních směsí bylo použito následujících materiálů:

Jemné kamenivo – čistý jemně rozdrcený  $\text{SiO}_2$

Elektrárenský popílek – popílek K6

Vláknové plnivo – ISOVER GRANULATE EN 13 501 – 1 Euroclass A1

### **3.1.3 Příprava zkušebních směsí pro vzorky v podobě válečků**

V experimentální části byly testovány celkem tři druhy geopolymerních směsí. Tyto směsi byly připravovány metodou, kdy se nejprve smíchal aktivátor Baucis L160 složka B a cement Baucis L160 složka A v určitém poměru. Po dosažení homogenní směsi byly přidány plniva a další určité množství aktivátoru Baucis L160 složka B. Směs byla dále míchána do dosažení homogenní směsi.

Zkušební vzorky a směsi byly označeny zkratkami podle použitého materiálu:

Pro první směs - GKP - bylo použito geopolymerního základu a jako plnivo jemné kamenivo a elektrárenský popílek.

Pro druhou směs - GP – bylo použito geopolymerního základu a jako plnivo elektrárenský popílek.

Pro třetí směs – GPV - Bylo použito stejné složení jako pro GP směs a bylo přidáno vláknové plnivo ISOVER.

Procentuální zastoupení jednotlivých složek v geopolymerních směsích:

Pro GKP: 40% Geopolymerního základu a to v poměru:

30% Cementu Baucis L160

70% Aktivátor Baucis L160

30% Jemného kameniva

30% Elektrárenského popílku K6

Pro GP: 37% Geopolymerního základu a to v poměru:

55% Cementu Baucis L160

45% Aktivátor Baucis L160

26% Aktivátor Baucis L160

37% Elektrárenského popílku K6

Pro GPV: 36% Geopolymerního základu a to v poměru:

55% Cementu Baucis L160

45% Aktivátor Baucis L160

26% Aktivátor Baucis L160

36% Elektrárenského popílku K6

2% ISOVER GRANULATE (Vláknové plnivo)

### **3.1.4 Průběh tepelné zátěže válcových vzorků**

Po dokončení vzorků byly po 30 dnech vysychání geopolymery vystaveny opakovaně tepelnému zatížení v peci. Podle pokynů se jednalo o 30 minutovou výdrž při určité teplotě a následnému ochlazení na vzduchu při laboratorní teplotě (asi 25°C) a opětovnému stejnému tepelnému zatížení a ochlazení na vzduchu.

Vzorky od každého druhu směsi byly rozděleny do skupin podle velikosti tepelné zátěže a to tak, že v každé skupině byly tři vzorky od každého druhu směsi popsány čísly od 1 do 3 podle toho, jak byly umístěny v peci, a to tak že vzorek č.1 byl vždy u dveří pece a ostatní v řadě za sebou podle čísel. Do pece se umísťovalo devět vzorků, a to vždy tři od každého druhu tak, že na levé straně pece byly vzorky GP uprostřed GPV a na pravé straně GKP. Skupiny vzorků byly opakovaně

zatěžovány v teplotách 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C a jedna sada vzorků ponechána bez tepelné zátěže pro srovnání.

Průběh tepelné zátěže pro každou skupinu vzorků byl stejný, jen se měnila teplota. Nejdříve se pec zahřála na požadovanou teplotu, poté se do ní umístily vzorky a nechaly se tam po dobu 30 minut, poté byly vyjmuty a ponechány při laboratorní teplotě vychladnout. Potom byly znovu umístěny do pece při stejné teplotě a opět zde ponechány 30 minut a po vyjmutí chladly při laboratorní teplotě. Takto se postupovalo stejně u všech tepelně zatěžovaných vzorků.

### 3.1.5 Vizuální kontrola

Při této kontrole se zrakem posuzovaly vlastnosti vzorků a to: jejich tvarová stálost, vlastnosti povrchu a případné vady.

Vyhodnocení:

- Vzorky při 1000°C:  
GKP – Tvarově deformovaný, ohořelý, větší trhliny.  
GPV – Tvarově stálý, místy větší trhliny.  
GP – Tvarově stálý, místy větší trhliny.
- Vzorky při 800°C:  
GKP – Tvarově deformovaný, ohořelá místa, větší trhliny.  
GPV – Tvarově stálý, místy větší trhliny.  
GP – Tvarově stálý, místy menší trhliny.
- Vzorky při 600°C:  
GKP – Tvarově stálý, mírně ohořelý, mírné trhliny.  
GPV – Tvarově stálý, téměř neznatelné trhliny.  
GP – Tvarově stálý, bez trhlín.
- Vzorky při 400°C:  
GKP – Tvarově stálý, mírné trhliny.  
GPV – Tvarově stálý, téměř neznatelné trhliny.  
GP – Tvarově stálý, bez trhlín.
- Vzorky při 200°C:  
GKP – Tvarově stálý, téměř neznatelné trhliny.  
GPV – Tvarově stálý, téměř neznatelné trhliny.  
GP – Tvarově stálý, bez trhlín.



### 3.1.6 Měření tvrdosti

Pro měření tvrdosti byla zvolena dynamická metoda ASTM A 956-00 měření dle Leeba a použita sonda pro běžné aplikace s označením D, vzhledem k malé hmotnosti vzorku jsme použily pevné podepření. Měření bylo prováděno za laboratorní teploty 25°C. Na každém vzorku se měřilo v pěti různých místech a poté se hodnota zprůměrovala.

Měření bylo prováděno pomocí Tvrdoměru MH-180 (Obr. 6). Tento tvrdoměr využívá systém měření na principu LEEB (dynamická odrazová metoda) s měřicím rozsahem: 170 ~ 960 HLD.



Obr. 6 Měření tvrdoměrem MH-180.

### 3.1.7 Měření jednoosé pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena podle EN ČSN 197-1 po 10 dnech, co byly vzorky vyjmuty z pece, na zkušebních vzorcích o počátečním průměru 46 mm a délce 90-95 mm. Jednoosá pevnost v tlaku byla měřena na hydraulickém přístroji

ZDM 500 kN pro měření pevnosti v tlaku (Obr. 7) s rozsahem měření 0-100kN a přesností 0,1 kN.

Zkušební válec byl upraven tak, aby měl obě plochy rovnoběžné a rovné, pro zabránění zkreslení měřených údajů. Poté byly na válci změřeny potřebné rozměry a válec byl vložen mezi desky lisu. Po kontrole uložení a nastavení lisu byly vzorky zatěžovány v tlaku. Manuálně řízené zatěžování bylo plynulé (nelze určit rychlost zatížení). Měření bylo ukončeno při destrukci vzorků, ne však před překročením kritického zatížení. Výsledná pevnost byla vypočítána ze vztahu (7):

$$R = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Kde  $F$ - maximální síla při porušení vzorku [N]

$A$ - zatěžovací plocha [mm<sup>2</sup>]



Obr. 7 Přístroj ZDM 500 kN pro měření pevnosti v tlaku.

Hodnoty pevnosti v tlaku byly stanoveny aritmetickým průměrem pevnostních hodnot zjištěných na příslušných zkušebních vzorcích z jedné sady vzorků.

### **3.2 Tepelná stabilita geopolymerního vzorku ve tvaru tenké desky**

#### **3.2.1 Příprava vzorku**

Pro tuto část byl vytvořen vzorek v podobě kompozitní desky o rozměrech 100x 200x2,8 mm. Tento vzorek se skládal z geopolymerní matrice a výplně ze skelných a čedičových materiálů v podobě plátna.

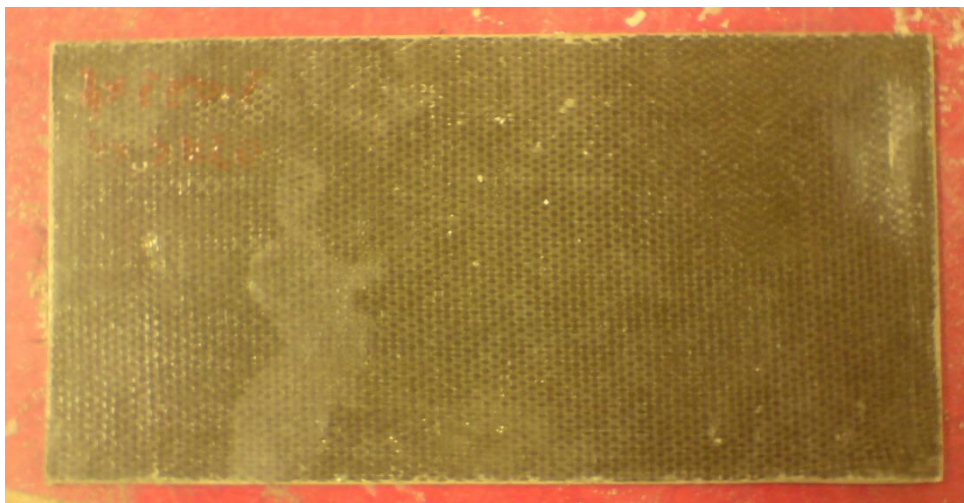
Příprava geopolymerního základu se skládala ze smíchání dvou základních složek a to aktivátoru Acti Q (s označením FC4 z Českých lupkových závodů) a suché složky v podobě prášku (s označením FC4 z Českých lupkových závodů) v poměru jednotlivých dílů 9:10, tato směs byla míchána 25 minut do dosažení homogenního stavu a poté přidáno 1,5 dílu prášku s označením M4 z Českých lupkových závodů a dále mícháno 20 minut.

Geokompozit byl vyroben postupným kladením jednotlivých vrstev pláten na sebe a pojených geopolymerní směsí (Obr. 8). A to v pořadí vrstev- dvě vrstvy z čedičového vlákna, čtyři ze skelného vlákna a nakonec dvě z čedičového vlákna. Poté byl vzorek zakryt, rovnoměrně zatížen, ponechán sedm dní schnout v laboratorní teplotě (asi 25°C) a upraven oříznutím na přesný rozměr 100x200 mm pro usazení do přípravku (Obr. 9).



Obr. 8 Příprava geopolymerní tenké desky- Pokládáním jednotlivých vrstev.





Obr. 9 Geopolymerní tenká deska v konečných rozměrech.

### 3.2.2 Upevnění vzorku do pece

Pro další zkoušení se zkušební geokompozit upevnil do pece pomocí speciálního přípravku z plechu o tloušťce 3mm. Rozměry obdelníkového přípravku byly stanoveny podle vnitřních rozměrů pece a to tak, že vnitřní rozměry přípravku byly 200x100 mm o délce 150mm (Obr. 10). Přípravek byl opatřen z jedné strany otvorem ve vzdálenosti 60mm pro vsunutí desky o tloušťce 3mm a ustavujícími držáky (Obr. 11).

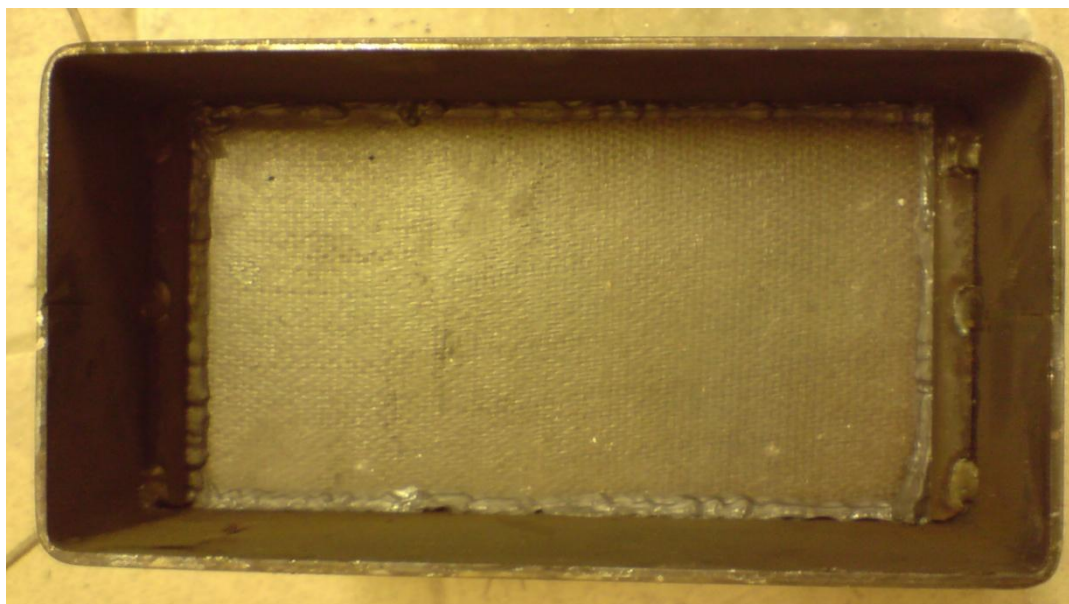


Obr. 10 Přípravek.



Obr. 11 Přípravek- pohled na ustavující držáky.

Zkušební vzorek byl upevněn do přípravku, kraje vzorku se utěsnily a pevně spojily s přípravkem pomocí běžného kamnářského tmelu od firmy Soudal (Obr. 12). Přípravek byl dále vsunut do pece a po stranách utěsněn pomocí kamnářského těsnícího provazu, aby z pece neunikalo teplo a my jsme měli přístup k druhé straně zkušebního vzorku (Obr.13).



Obr. 12 Přípravek s upevněným vzorkem.



Obr. 13 Přípravek po vložení do pece.

### 3.2.3 Průběh tepelné zátěže

Po upevnění přípravku se zkušebním vzorkem do elektrické pece se vzorek zatěžoval tepelně ze strany vložené do pece a na druhé straně byla laboratorní teplota. Průběh zátěže byl stanoven po 200°C až do 600°C a to tak, že vzorek byl pozvolna (rychlostí přibližně 1K / 5s) zahřán na 200°C, poté následovala půl hodinová výdrž na této teplotě a takto se postupovalo po 200°C až do 600°C. V celém průběhu zahřívání byla sledována teplota venkovní strany pomocí termokamery Fluke Ti25 a průběžně byly pořizovány snímky.

### 3.2.4 Tahová zkouška

Pro tuto zkoušku se z desky odříznulo pět vzorků a jeden vzorek byl pro srovnání odříznut před tepelnou zátěží. Vzorky měly rozměry 98 x 15 mm. Zkouška se prováděla na universálním stroji Instron 4202 vybaveného počítačem pro zpracování údajů. Byly měřeny mechanické vlastnosti jako mez pevnosti v tahu, Younguv modul pružnosti a maximální zatížení. Z pěti vzorků se úspěšně povedlo naměřit pouze dva a referenční vzorek.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUSE

### 4.1 Výsledky naměřených hodnot válcových vzorků

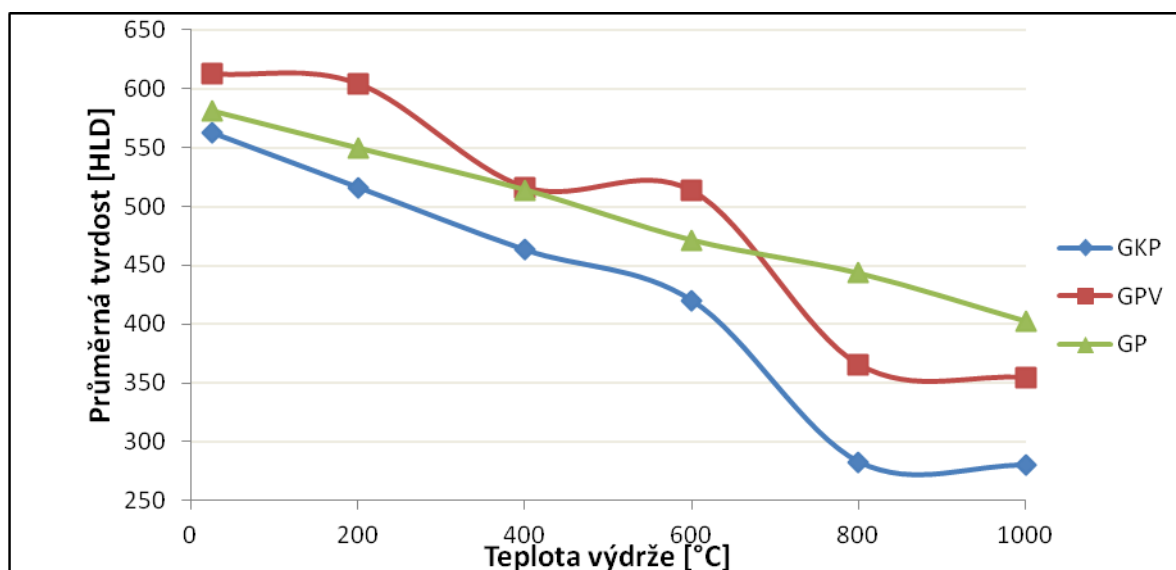
V této části je porovnání naměřených mechanických hodnot jednotlivých vzorků z různých geopolymerních materiálů ve tvaru válečků.

Naměřené hodnoty tvrdosti dle Leeba jsou znázorněny v Tab. 1, jejich grafické znázornění je prezentováno v grafu 1.

Naměřené hodnoty a vypočítané pevnosti v tlaku jsou znázorněny v Tab. 2 a Tab. 3, jejich grafické znázornění je poté prezentováno v grafu 2.

Tab. 1 Naměřené hodnoty tvrdosti.

Tepelná zátěž	číslo vzorku	Průměrná tvrdost vzorku [HLD]		
		GKP	GPV	GP
1000°C	1	310	373	395
	2	287	340	431
	3	244	350	382
průměrná tvrdost [HLD]		280	354	403
800°C	1	271	380	448
	2	276	363	453
	3	302	353	429
průměrná tvrdost [HLD]		283	365	443
600°C	1	417	511	474
	2	416	505	484
	3	427	523	456
průměrná tvrdost [HLD]		420	513	471
400°C	1	482	528	522
	2	447	516	525
	3	460	504	495
průměrná tvrdost [HLD]		463	516	514
200°C	1	540	586	529
	2	506	606	556
	3	502	620	563
průměrná tvrdost [HLD]		516	604	549
25°C	1	565	607	583
	2	550	628	564
	3	572	602	595
průměrná tvrdost [HLD]		562	612	581



Graf. 1 Srovnání naměřených hodnot tvrdosti dle Leeba geopolymerních vzorků v podobě válečků.

### Vyhodnocení

Jak je patrné z grafu, tvrdost se snižovala v závislosti na velikosti tepelné zátěže. Jako směs s nejlepší tvrdostí lze označit testovanou směs na bázi kopolymeru a popílku GP. Ostatní dvě směsi měly nižší naměřené hodnoty, ale průběh úbytku tvrdosti byl u obou směsí podobný. Nejnižší tvrdost byla naměřena u směsi geopolymerního popílku a kamene GKP.

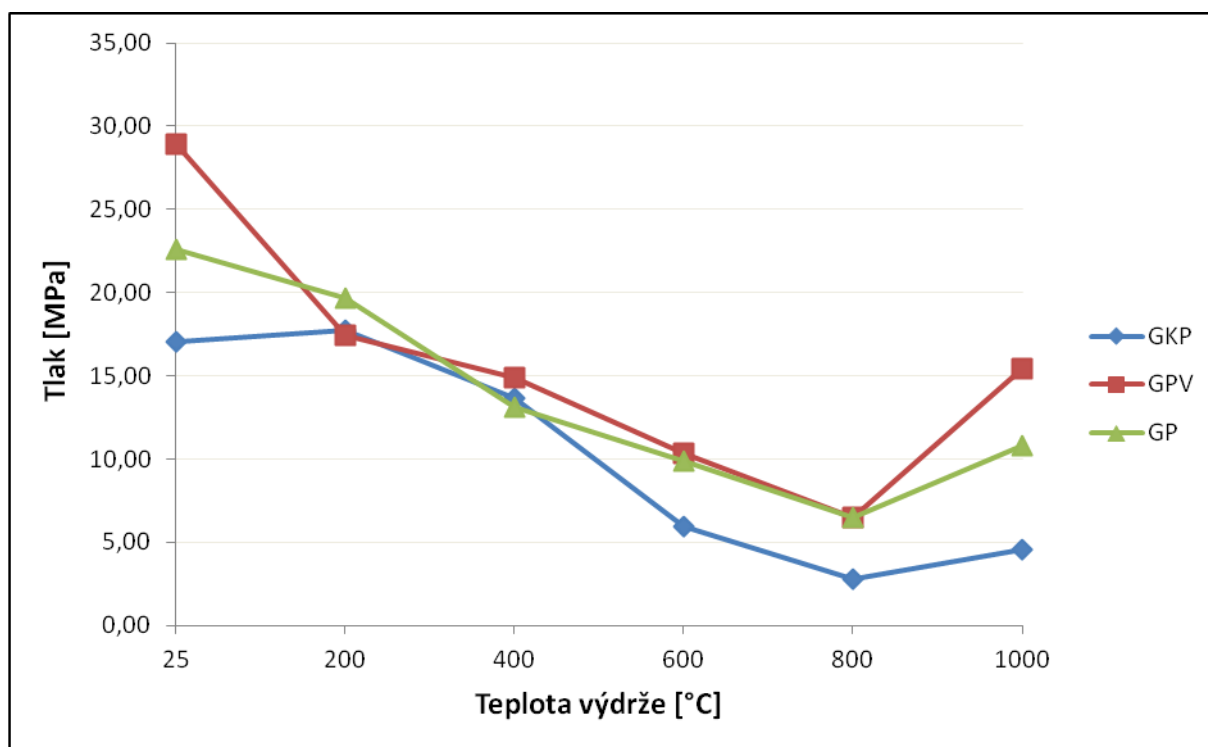


Tab. 2 Naměřené hodnoty zkoušky tlakem u vzorků v podobě válečků.

Tepelná zátěž	Druh materiálu	Číslo vzorku	Průměr [mm]	Délka [mm]	Síla F [N]	Plocha A [mm <sup>2</sup> ]	Tlak R [MPa]
1000°C	GKP	1	52,00	98,00	9800,00	2123,71	4,61
		2	50,00	98,00	9200,00	1963,49	4,69
		3	51,00	97,50	8900,00	2042,82	4,36
	Průměrné hodnoty		51,00	97,83	9300,00	2043,34	4,55
	GPV	1	45,00	90,50	21000,00	1590,43	13,20
		2	45,00	90,50	28000,00	1590,43	17,61
		3	45,20	90,20	25000,00	1604,60	15,58
	Průměrné hodnoty		45,07	90,40	24666,67	1595,15	15,46
	GP	1	45,10	92,20	14000,00	1597,51	8,76
		2	45,00	90,80	20800,00	1590,43	13,08
		3	45,00	91,20	17000,00	1590,43	10,69
	Průměrné hodnoty		45,03	91,40	17266,67	1592,79	10,84
800°C	GKP	1	47,00	96,00	5200,00	1734,94	3,00
		2	47,00	89,00	5000,00	1734,94	2,88
		3	46,00	92,00	4000,00	1661,90	2,41
	Průměrné hodnoty		46,67	92,33	4733,33	1710,60	2,76
	GPV	1	45,20	85,00	11000,00	1604,60	6,86
		2	44,50	89,00	9500,00	1555,28	6,11
		3	44,50	88,00	10200,00	1555,28	6,56
	Průměrné hodnoty		44,73	87,33	10233,33	1571,72	6,51
	GP	1	45,20	89,00	11600,00	1604,60	7,23
		2	45,50	89,50	9500,00	1625,97	5,84
		3	44,50	88,50	9800,00	1555,28	6,30
	Průměrné hodnoty		45,07	89,00	10300,00	1595,28	6,46
600°C	GKP	1	45,50	88,00	9000,00	1625,97	5,54
		2	45,50	86,50	9000,00	1625,97	5,54
		3	45,50	84,50	11000,00	1625,97	6,77
	Průměrné hodnoty		45,50	86,33	9666,67	1625,97	5,95
	GPV	1	45,50	90,50	16000,00	1625,97	9,84
		2	45,50	91,60	16500,00	1625,97	10,15
		3	45,50	92,50	18000,00	1625,97	11,07
	Průměrné hodnoty		45,50	91,53	16833,33	1625,97	10,35
	GP	1	45,00	90,10	17500,00	1590,43	11,00
		2	45,80	88,00	16500,00	1647,48	10,02
		3	45,20	91,00	14000,00	1604,60	8,72
	Průměrné hodnoty		45,33	89,70	16000,00	1614,17	9,91

Tab. 3 Naměřené hodnoty zkoušky tlakem u vzorků v podobě válečků.

Tepelná zátěž	Druh materiálu	Číslo vzorku	Průměr [mm]	Délka [mm]	Síla F [N]	Plocha A [mm <sup>2</sup> ]	Tlak R [MPa]
400°C	GKP	1	45,10	88,20	23500,00	1597,51	14,71
		2	45,20	88,20	20000,00	1604,60	12,46
		3	45,00	88,50	22000,00	1590,43	13,83
	Průměrné hodnoty		45,10	88,30	21833,33	1597,51	13,67
	GPV	1	46,10	90,00	26700,00	1669,13	16,00
		2	45,20	88,00	25800,00	1604,60	16,08
		3	45,00	92,00	20000,00	1590,43	12,58
	Průměrné hodnoty		45,43	90,00	24166,67	1621,39	14,88
	GP	1	45,20	90,20	22500,00	1604,60	14,02
		2	46,20	91,20	23000,00	1676,38	13,72
		3	46,00	92,20	19200,00	1661,90	11,55
	Průměrné hodnoty		45,80	91,20	21566,67	1647,63	13,10
200°C	GKP	1	46,50	91,00	33900,00	1698,23	19,96
		2	45,70	87,20	28500,00	1640,29	17,37
		3	45,80	90,00	26000,00	1647,48	15,78
	Průměrné hodnoty		46,00	89,40	29466,67	1662,00	17,71
	GPV	1	46,00	90,00	28800,00	1661,90	17,33
		2	46,00	93,50	30000,00	1661,90	18,05
		3	46,00	90,50	28000,00	1661,90	16,85
	Průměrné hodnoty		46,00	91,33	28933,33	1661,90	17,41
	GP	1	46,30	94,50	31500,00	1683,65	18,71
		2	46,80	90,00	31000,00	1720,21	18,02
		3	46,50	93,50	37800,00	1698,23	22,26
	Průměrné hodnoty		46,53	92,67	33433,33	1700,69	19,66
25°C	GKP	1	46,00	88,80	25000,00	1661,90	15,04
		2	46,00	89,60	34000,00	1661,90	20,46
		3	46,00	89,20	26000,00	1661,90	15,64
	Průměrné hodnoty		46,00	89,20	28333,33	1661,90	17,05
	GPV	1	46,60	91,00	45200,00	1705,54	26,50
		2	46,00	88,50	51000,00	1661,90	30,69
		3	45,50	93,00	48000,00	1625,97	29,52
	Průměrné hodnoty		46,03	90,83	48066,67	1664,47	28,90
	GP	1	46,80	92,50	37500,00	1720,21	21,80
		2	46,50	92,50	37700,00	1698,23	22,20
		3	46,50	93,00	40600,00	1698,23	23,91
	Průměrné hodnoty		46,60	92,67	38600,00	1705,55	22,64



Graf. 2 Srovnání pevnosti v tlaku v závislosti na zatěžované teplotě u vzorků z geopolymerních směsí v podobě válečků.

### Vyhodnocení

Pevnost v tlaku u všech testovaných směsí má podobný průběh v závislosti na tepelném zatěžování. Nejlépe si zachovávala pevnost směs z geopolymerního popílku a čedičového vlákna GPV, po překročení hodnoty 800 °C se dokonce i zvýšila. Nejhuře si pevnost v tlaku zachovávala směs z geopolymerního popílku a kamene GKP, která má podobný průběh jako ostatní směsi do 400 °C, avšak poté se její pevnost začíná snižovat.

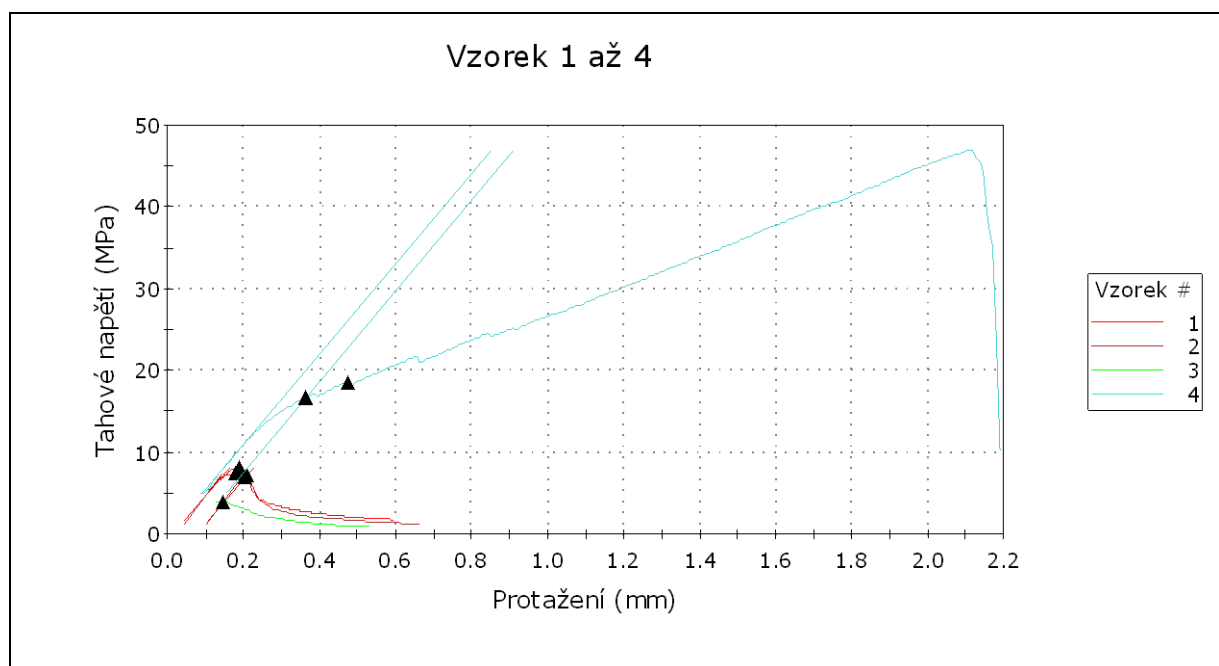
## **4.2 Výsledky naměřených hodnot vzorku v podobě tenké geopolymerní desky**

### **4.2.1 Hodnoty naměřené při zkoušce tahem**

Výsledek této zkoušky byl přímo zpracován pomocí měřicího přístroje Instron 4202. Výstupem této zkoušky na tomto přístroji je grafické znázornění průběhu jednotlivých měření (graf. 3) a tabulka s naměřenými hodnotami Tab. 4. Tloušťka vzorků byla 2,8 mm u referenčního vzorku a 3,4 mm u tepelně zatíženého. Zvětšení tloušťky vzorku pravděpodobně vzniklo nabobtnáním při uvolňování vody ze vzorku.

Tab. 4 Naměřené hodnoty pomocí Instron 4202 u zkoušky tahem.

Naměřené hodnoty	R <sub>m</sub> (MPa)	Maximální zatížení (kN)	Modul (Automatic Young's) (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)
1. Vzorek 2	8.06	0.399	1594	7.1
2. Vzorek 4	7.32	0.379	1795	7.08
3. Vzorek 5	3.93	0.212	-----	-----
4. Referenční vzorek 0	46.87	2.774	1663	16.6
Maximální	46.87	2.774	1795	16.6
Minimální	3.93	0.212	1594	7.08
Standardní odchylka	20.3	1.22	102	5.5
Střední	16.6	0.941	1684	10.3



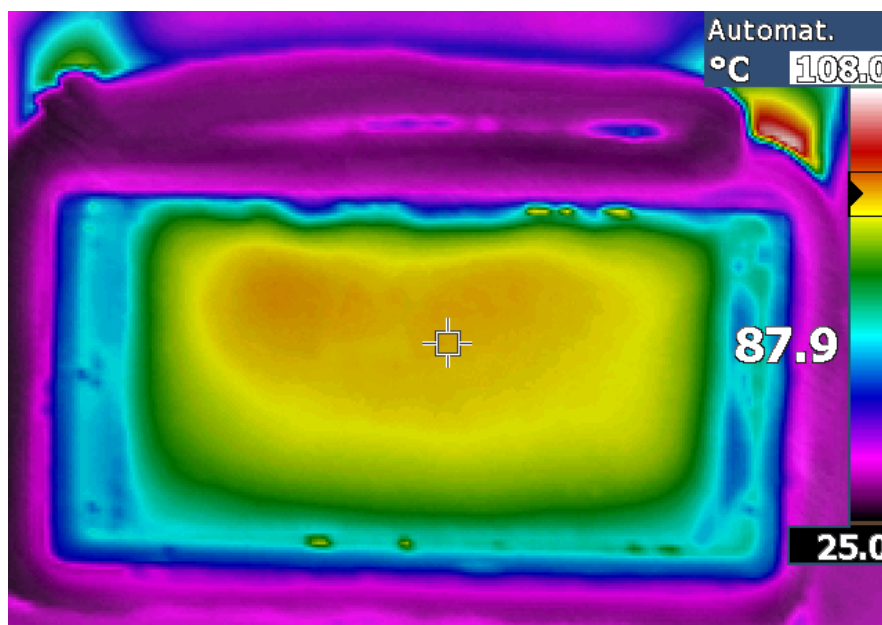
Graf. 3 Grafický průběh napětí v tahu z Instron 4202.

### Vyhodnocení

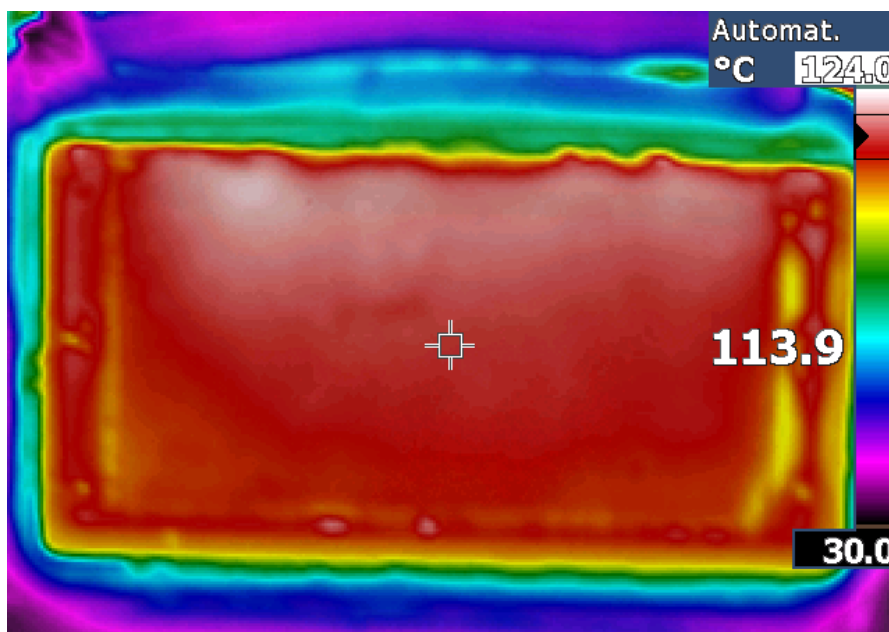
Jak je patrné z grafu a naměřených hodnot, pevnost  $R_{p0,2}$  se po tepelném zatěžování snížila skoro o polovinu. Třetí vzorek byl zřejmě špatně upnut, protože všechny vzorky pocházejí ze stejného původního vzorku, který byl stejně tepelně zatěžován v každé části (vzorek v podobě desky). Tloušťka vzorku se zvýšila z původních 2,8 mm na 3,4 mm, pravděpodobně nabobtnala při uvolňování zbytkové vody uzavřené v geopolyméru.

#### 4.2.2 Naměřené hodnoty geopolymerní tenké desky termokamerou

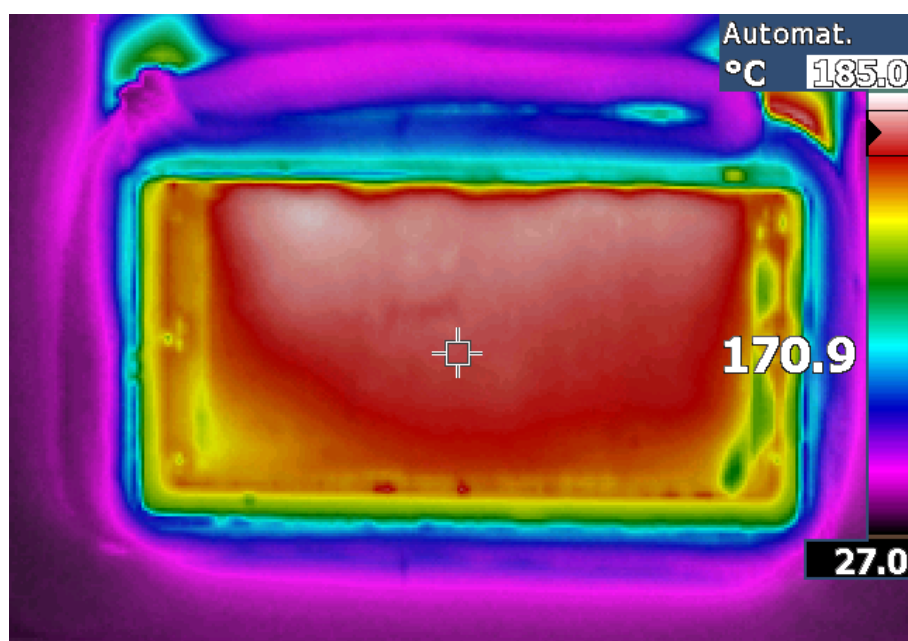
V této části jsou výsledky měření teploty povrchu uprostřed desky při tepelném zatěžování v peci. Teploty byly pořizovány v průběhu celého tepelného zatěžování. Fotky termokamerou Fluke Ti25 byly vždy pořízeny v čase, když se dosáhlo požadované teploty Obr. 14-19.



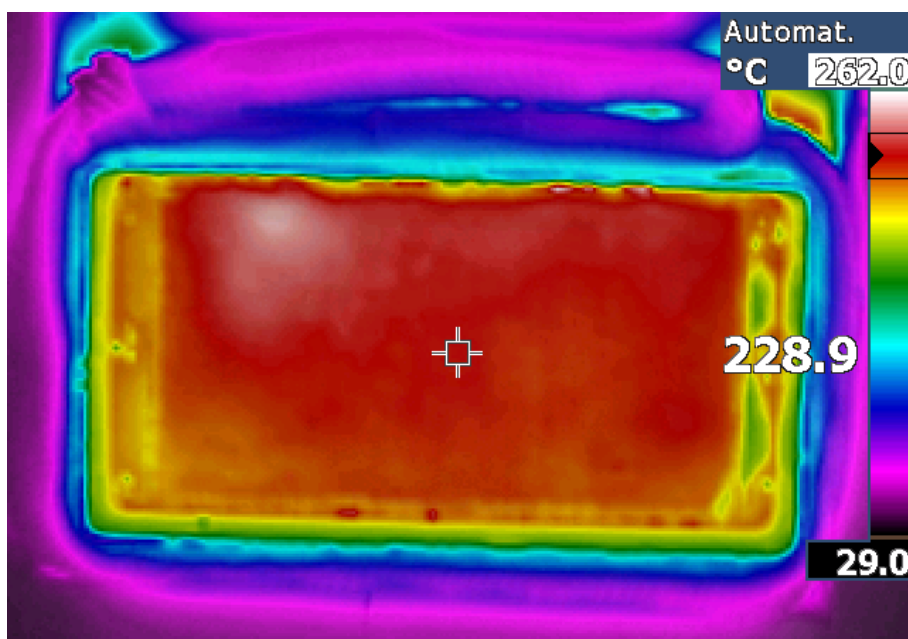
Obr. 14 Venkovní teplota desky 87,9°C, při dosažení 200°C v peci.



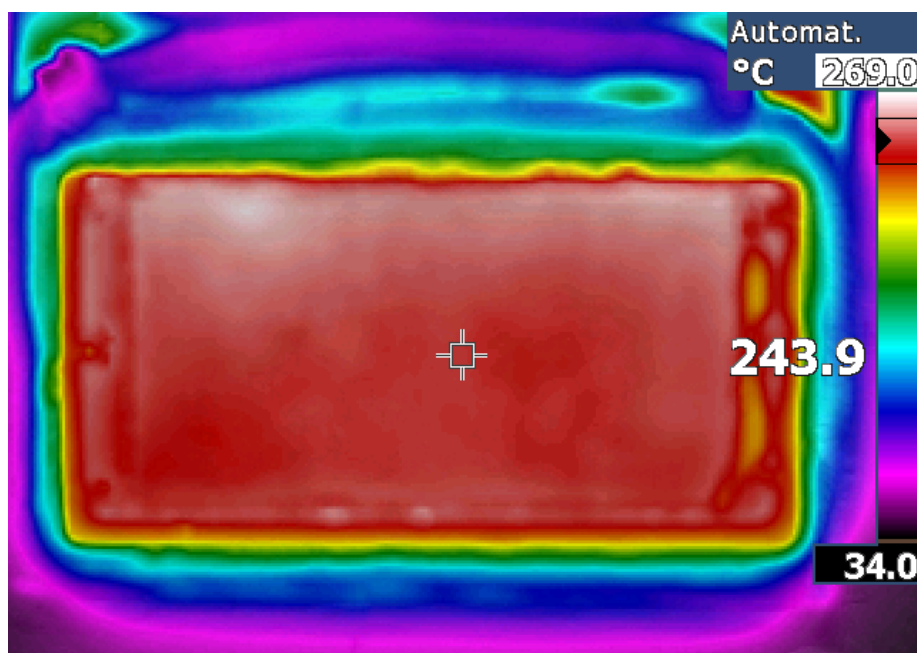
Obr. 15 Venkovní teplota desky 113,9°C, při 200°C v peci po 30 minutách tepelné zátěže na teplotě 200°C.



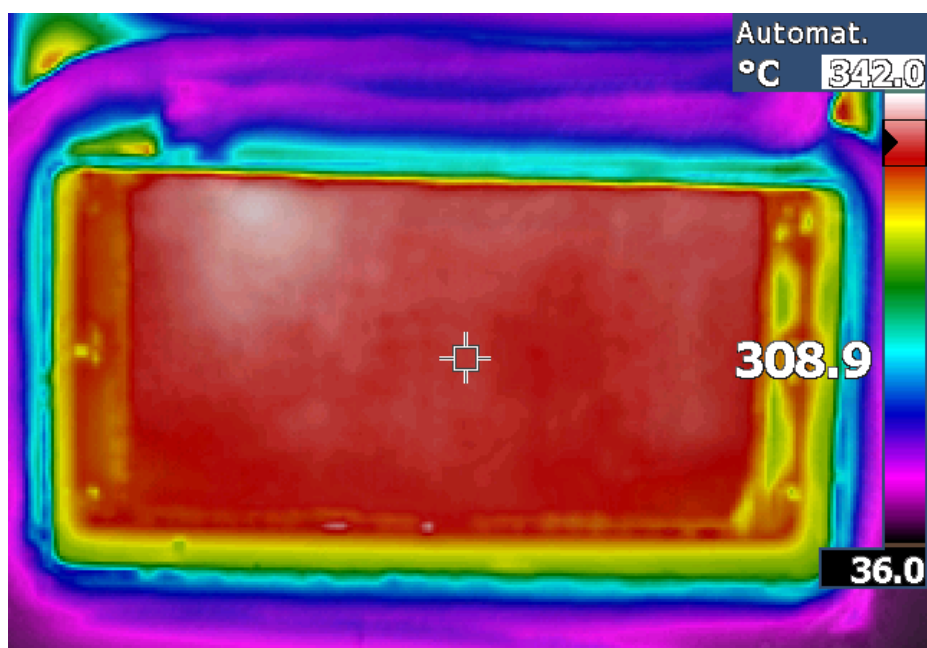
Obr. 16 Venkovní teplota desky 170,9°C, při dosažení 300°C v peci.  
(průběžně měřeno při přechodu na teplotu 400°C)



Obr. 17 Venkovní teplota desky 228,9°C, při dosažení 400°C v peci.



Obr. 18 Venkovní teplota desky 243,9°C, při 400°C  
v peci po 30 minutách tepelná zátěže na 400°C.



Obr. 19 Venkovní teplota 308,9°C desky při 500°C v peci.

### Vyhodnocení

Jak je vidět na snímcích, deska měla venkovní teplotu vždy nižší od 130°C až do 200°C, podle teploty uvnitř pece, a to při tloušťce stěny do 3 mm. Výsledkem je, že by tento materiál mohl sloužit jako tepelná izolace, ale vzhledem k nedostatku dalších informací bude potřeba dalšího výzkumu.

## 5 ZÁVĚR

Práce se zabývala možnostmi využití odpadních materiálů, jako jsou popílek a kamenivo prostřednictvím alkalické aktivace pro použití za vysokých teplot. K alkalické aktivaci byly použity tři druhy různých poměrů odpadních materiálů, které byly zahřívány opětovně v peci na určité teploty a následně měřeny jejich mechanické vlastnosti.

Po seznámení s vlastnostmi geopolymérů byly navrženy způsoby a metodiky k měření chování vybraných geopolymerních směsí. Z naměřených hodnot lze určit závěry, že některé materiály je možné použít při vysokých teplotách. Po překročení teploty 800°C dochází k zajímavému jevu zvýšení pevnosti v tlaku u všech měřených vzorků, který je pravděpodobně způsoben změnou vnitřní struktury geopolyméru s použitými materiály. Tento názor bude dále experimentálně ověřován a zkoumán.

U směsi s obsahem kameniva a popílku GKP byly naměřeny nejmenší hodnoty mechanických vlastností vzhledem k ostatním vzorkům. Tvrdost měly všechny vzorky na počátku měření skoro stejnou, ale po skončení opětovného tepelného zatěžování se už u vzorků zatěžovaných přes 400°C výrazně lišily. Při měření zkouškou tlakem byly také u této směsi (GKP) naměřeny nejmenší hodnoty po překročení 400°C.

Jako nejschopnější materiály vzhledem k měřeným mechanickým vlastnostem se jevila směs s přidáním pouze popílku GP. Její mechanické vlastnosti poklesly během tepelného namáhání, ale vždy měl lepší nebo srovnatelné výsledky s ostatními vzorky po celou dobu tepelného zatěžování. Jelikož jsem neměl možnost srovnání vzorků s jiným měřením se stejně tepelně namáhanými vzorky, jsou tyto hodnoty a měření pouze orientační a mohou sloužit jako výchozí měření pro další zkoumání těchto druhů geopolymerních směsí.

U vzorku v podobě geopolymerní desky s použitím tkanin byly zpracovány výsledky ze zkoušky tahem a pozorování venkovních teplot pomocí termokamery, jako vstupní informace pro další zkoumání. Výsledkem měření bylo zjištěno, že tento materiál by měl vydržet i větší teploty a mohl by sloužit i jako tepelně izolační vrstva.



## 6 Seznam použité literatury

1. Straňák, V.: Geopolymery. [online]. [http://matrix-012.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1149:geopolymery&catid=64:rzne&Itemid=88](http://matrix-012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery&catid=64:rzne&Itemid=88) [cit. 3.12.2011].
2. Davidovits, J.: Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions, Geopolymer institute 2005, ISBN 2-9514820-0-0.
3. Straňák, V.: 2008 – Klonování kamene aneb vzpomínky na budoucnost. Alternativy. Můj dům str. 218. Univerzita Tomáše Bati.
4. Červinka, J.: Geopolymery- Využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů, Bakalářská práce, Pardubice FR, 2008.
5. Dědečková, L. Geopolymery - Od pyramid k mostům. [online] <http://www.4-construction.com/cz/clanek/geopolymery-od-pyramid-k-mostum/> [cit. 5.12.2011].
6. Maršálková, E. Malá, J. [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009\\_07\\_595-598.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009_07_595-598.pdf). [cit. 18.12.2011].
7. Škvára, F. Alkalicky aktivované materiály – geopolymery. Informátor : Česká společnost pro výzkum a využití jílů. 2007. ISSN 1802-2499.
8. Opravil, T., Brandštetr, J., Havlica, J. Frank, V. Geopolymery na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře. Brno 20. března 2008, ISBN 978-80-214-3582-7.
9. Pacheco-Togal, F., Castro-Gomas, J., Jalali, S.: Alkali activated binders, Part 2. About materials and binders manufacture, Construction and building Materials, 2007.
10. Smejkal, J. Měření tvrdosti dle ASTM A 956-00. [online] <http://www.testima.eu/prilohy/149/astm956.pdf>. [cit. 19.12.2011].
11. Machovský, T.: Testování relativity surovin pro geopolymery, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně FT, 2009

## 7 Přílohy

TECHNICKÝ LIST	
Podniková norma:	Čedičová tkanina
Technický list číslo:	002 – 2005
Název:	TK-210
<i>Technické parametry:</i>	
1. Použitý materiál:	100 % Basalt
2. Délkové hmotnosti:	
- osnova /tex/:	
- útek /tex/:	
3. Dostava /na 1cm/:	
- osnova:	10 +1
- útek :	8 ±1
4. Vazba	Atlas
5. Standardní šíře /cm/:	100 +2/-1
6. Délka role /m/:	100
7. Plošná hmotnost /g/m <sup>2</sup> /:	210 ± 20
8. Obsah spalitelných látek /%/:	1,3
9. Tloušťka /mm/ :	0,18
10. Pevnost /min. N/5 cm/:	
- osnova:	930
- útek:	880
11. Kraje :	Perlínka
12. Ostatní údaje:	-
13. Balení:	Baleno v POE fólii.
14. Max. teplota při používání /°C/:	650
15. Krátkodobá tepelná expozice /°C/ :	800
16. Skladování:	Skladování v suchých skladech, na roli nesmí působit žádný tlak. Teplota skladování je -10 °C až + 50 °C.
Nahrazuje :	Účinnost: 1.3. 2005

Technický list – Skelná tkanina

JIANGSU JIUDING NEW MATERIAL CO.,LTD.

ADDRESS: NO.1 ZHONGSHAN ROAD,RUGAO CITY 226500 JIANGSU CHINA

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Name	ER490-4.5X3.6-1000	Test By	Q/C
Manufacture Number	: JD100905002	Sampling From	: Weaving cloth Dept.
Production Date	: SEPT.7 , 2010	Product Grade	: “ A “ Grade
Lot Number	: JDM10139	Purchase Order No	102000736
Lot Capacity	:2030KGS	Vessel/Voyage No.	MSC IVANA-L1043R

General Data:

Glass Type	:E GLASS	Filament Diameter	: 17um
Density	: 4.5x3.6ends/cm	Sizing	General use
Yarns use	Warp	Color	White
	Weft		
	: EC17-600tex		
	: EC17-600tex		

Properties For Control Report:

		Accepted Standards		Test Results	
		Standard No.	Standard Value	Average Value	Result
Sizing(%)		GB/T 9914.2-2001	0.4~0.8	0.54	PASS
Moisture content (%)		GB/T9914.1-2001	≤0.20	0.09	PASS
Density (ends/cm)	Warp	GB/T 7689.2-2001	4.5±0.45	4.5	PASS
	Weft	GB/T7689.2-2001	3.6±0.36	3.6	PASS
Tensile strength (Newton/50*200mm) (Sampling size:50x200mm)	Warp	GB/T 7689.5-2001	≥3600	5431	PASS
	Weft	GB/T7689.5-2001	≥2750	4295	PASS
Mass(g/m2)		GB/T9914.3-2001	490±40	490	PASS
Width(cm)		GB/T7689.3-2001	100±1.0	100.0	PASS
Length(m)		GB/T7689.3-2001	70±1.5	70.0	PASS

Test Conditions:

Room Temperature : 24C

Humidity : 48 %

Inspect By: 0259 Approval By: 0186 Date: SEPT.7,2010